

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**Робоча програма,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів»
для студентів спеціальності 6.050401 – металургія
(освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр)**

Дніпро НМетАУ 2018

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**Робоча програма,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів»
для студентів спеціальності 6.050401– металургія
(освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр)**

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,
затвердженим Вченою радою НМетАУ
Протокол № 1 від 01.02.2018

Дніпро НМетАУ 2018

УДК 669.041/046

Робоча програма, методичні вказівки до виконання практичної роботи та індивідуального завдання з дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів» для студентів спеціальності 6.050401 – металургія (освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр) / Укл.: О.О. Єрємін, Л.О. Воробйова, О.В. Гупало. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 28 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки до виконання практичної роботи з дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів», приклад розрахунку індивідуального завдання, контрольні запитання, рекомендована література.

Призначена для студентів спеціальності 6.050401 – металургія (ОКР бакалавр) заочної форми навчання.

Друкується за авторською редакцією.

Укладачі: О.О. Єрємін, д-р техн. наук, проф.
Л.О. Воробйова, канд. техн. наук, доц.
О.В. Гупало, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск О.О. Єрємін, д-р техн. наук, проф.

Рецензент Стоянов О.М., канд. техн. наук, доц. (НМетАУ)

Підписано до друку 31.10.2018. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский. Обл.-вид. арк. 2,35. Умов. друк. арк. 2,32. Замовлення № 167.

Національна металургійна академія України
49600, Дніпро – 5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

ВСТУП

Технологічні процеси виробництва чорних металів, зокрема процеси плавлення сталі, нагрівання злитків та заготовок перед обробкою тиском, термічна обробка прокату, відносяться до високотемпературних процесів. Основним металургійним обладнанням для їх реалізації є високотемпературні теплові агрегати – плавильні, нагрівальні та термічні печі. В робочому просторі металургійних печей відбуваються процеси генерації теплової енергії від спалювання палива та передача її матеріалам або виробам, які піддається тепловій обробці.

Основи теорії спалювання палива, руху димових газів та теплопередачі розглядаються при вивченні дисципліни «Теплотехніка», а найбільш поширені конструкції теплових агрегатів – при вивченні дисципліни «Металургійні печі», які, відповідно, входять до циклів дисциплін фундаментальної та фахової підготовки робочих навчальних планів підготовки фахівців зі спеціальності 136 – Металургія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Дисципліна «Конструкції технологічних агрегатів» відноситься до циклу дисциплін вільного вибору. Її спрямовано на розширення знань фізичної сутності та характеру обігу процесів, що відбуваються при виробництві чавуну, сталі та продуктів прямого відновлення заліза, конструктивних особливостей та режимів роботи основних теплових агрегатів доменних та сталеплавильних цехів металургійного підприємства. Окремі розділи дисципліни, присвячені процесам нагрівання та термічної обробки металів, поглиблюють знання з конструкції та особливостей теплової роботи печей, якими обладнуються прокатні, ливарні, ремонтно-механічні цеха металургійних та машинобудівних підприємств. Під час викладання та вивчення дисципліни особлива увага приділяється визначенню взаємозв'язків між характером та інтенсивністю процесів теплообміну, що протікають в робочому просторі теплових агрегатів, конструктивними особливостями печей і техніко-економічними показниками їх роботи; на основі аналізу теплових балансів печей визначаються перспективні шляхи підвищення енергоефективності теплових агрегатів та енергоємність виробництва в цілому.

1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТИВ»

Розподіл навчальних годин

Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	240
аудиторні заняття, з них:	40
лекції	24
лабораторні роботи	–
практичні заняття	16
семінарські заняття	–
Самостійна робота, у тому числі при:	200
вивченні розділів програми, які не викладаються на лекціях	188
виконанні індивідуальних завдань	12
Підсумковий контроль	екзамен

Навчальна дисципліна «Конструкції технологічних агрегатів» є вибірковою і входить до циклу дисциплін вільного вибору студента.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань про фізичну сутність, способи та характер протікання процесів нагріву та плавлення матеріалів в теплових агрегатах металургії, конструктивні особливості та теплову роботу цих агрегатів і придбання навичок з питань розрахунків й експлуатації промислових печей.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен **знати**:

- основне та допоміжне обладнання цехів металургійного заводу та їх місце в технологічному виробничому ланцюгу;
- класифікацію та конструкції устаткування для нагріву та плавлення матеріалів;
- способи нагріву та плавлення матеріалів в печах.

вміти:

- за допомогою штатних вимірювальних приладів контролювати режим роботи металургійних агрегатів;
- скласти перелік заходів для введення теплотехнічного устаткування в експлуатацію та контролю за його роботою;

- з урахуванням визначених способів нагріву матеріалів, а також об'єму виробництва обрати і обґрунтувати необхідне технологічне устаткування для реалізації теплової обробки.

Критерії успішності – отримання позитивних оцінок при складанні індивідуального завдання та екзамену у тестовій формі.

Засоби діагностики успішності навчання – комплект вихідних даних до виконання індивідуального завдання по розрахунку сталеплавильного агрегату, комплект тестових завдань до складання екзамену.

Зв'язок з іншими дисциплінами – вивчення дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів» базується на знанні широкого кола питань, попередньо опанованих у курсах «Вища математика», «Фізика», «Теплотехніка», «Металургійні печі», «Основи металургії», «Основи обробки металів» та ін.

Набуті знання і вміння використовуються при вивченні дисциплін «Технології нагрівання сталі», «Технологічне проектування», «Технологія процесів промислової теплотехніки», «Теорія печей», під час виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра.

Зміст дисципліни

Паливо, сировина й продукти доменної печі. Шихта доменної плавки, призначення основних її складових. Джерела заліза в доменній шихті. Агломерація. Кокс та його призначення. Чавуни їх різновиди, Склад чавунів. Доменний газ, його використання. Доменні шлаки. Основність шлаків. Використання шлаків.

Профіль доменної печі. Устрій і призначення колошника, шахти, распару, заплечиків, горну. Фурми, кільцевий повітропровід. Технологічні процеси в доменній печі.

Конструкція доменної печі. Завантажувальні пристрої. Холодильники доменної печі. Розміри, ємність доменних печей. Конструкція футерівки доменної печі. Льотки – чавунна та шлакова. Конструкція фурм та кільцевого повітропроводу.

Конструкції та робота повітронагрівачів. Призначення та профіль повітронагрівачів. Конструкції сучасних повітронагрівачів, їхня робота.

Насадка повітронагрівачів. Регулювання температури під куполом повітронагрівачів. Пальникові пристрої повітронагрівачів.

Сучасні процеси отримання заліза. Сучасні способи та агрегати отримання заліза. Пряме отримання заліза. Нові способи отримання чавуну. Відновлювання залізної руди воднем у зваженому стані.

Механіка газів шарового процесу. Газодинамічна характеристика шару шихтових матеріалів. Рух дуття від повітронагрівачів до доменної печі. Принцип безупинної роздачі і розподілу дуття по фурмах. Опір прямуюванню газів шару грудкових матеріалів. Вітання часток у газовому потоці. Явище підвисання шихти. Зміна тиску при нагріванні та охолоджуванні газів при їх русі в печі.

Горіння вуглецю у шарі. Горіння вуглецю у шарі при помірних температурах – газогенераторний процес. Склад генераторних газів. Горіння коксу у шарі при високих температурах в фурменій зоні доменної печі. Пряме та непряме відновлювання заліза в печі. Склад газової фази на рівні фурмених зон.

Теплообмін в шарі. Теплообмін конвекцією в шарі грудкових матеріалів. Визначення об'ємного коефіцієнту тепловіддачі конвекцією. Роль випромінювання в перерозподілу теплоти між елементами шихти.

Нагрівання тіл у протитечії. Поняття про водяний еквівалент. Виведення формул нагрівання тіл у протитоку. Температурні та теплові діаграми нагрівання матеріалів при різних співвідношеннях водяних еквівалентів потоків газу та матеріалу. Час нагрівання

Паливо, шихта й продукти ванної сталеплавильної печі. Схема роботи печі. Мартенівська піч. Двохванна піч. Піч-ківш. Устрій та призначення. Шихта плавильної печі. Питома витрата шихти. Окиснювач плавки. Паливо в ванній плавильній печі. Продукти плавки. Продувка ванни печі киснем – переваги та недоліки. Принципова схема роботи мартенівської печі. Призначення та робота клапанів. Двох- та чотирьох регенераторні печі. Переваги та недоліки схем.

Конструкція елементів сталеплавильної печі. Робочій простір печі. Колони, балки, ферми печі. Устрій подини, склепіння та бокових стін печі. Призначення та технологія наварки поду. Відкоси бокових стін. Ремонт та відновлювання відкосів. Робочі вікна. Пороги. Склад розливочного прольоту. Устрій склепіння, умови його експлуатації. Різновиди головок мартенівської

печі. Одно- та двохканальні головки печі. Головка Вентурі. Трьохканальні головки. Умови їх застосування. Переваги та недоліки схем з різними конструкціями головок. Газо-мазутна форсунка. (Пальник високого тиску). Шлаковики. Регенератори. Рух газів в перерізі регенераторів. Клапана. Борова. Засувки. Робоча площадка печі

Конструкції конвертерів. Дугова сталеплавильна піч. Киснево-конвертерний процес. Схеми конвертерів. Схеми ДСП.

Спалювання палива в печі. Факельні процеси. Факельний процес в ванній плавальної печі та його закономірності. Фактори, що впливають на довжину турбулентного факелу. Вимоги к високотемпературному факелу мартенівської печі. Жорсткість. Настильність. Спрямованість. Світимість. Забезпечення вимог до факелу. Факели, що утворюються при спалюванні різних видів палива. Керування довжиною факелу в печах

Теплотехнічні та технологічні періоди нагрівання і плавки шихти. Показники теплової роботи плавильної печі. Тривалість та призначення різних періодів плавки. Заправка. Завалка шихти. Порядок та правіла завалки. Нагрівання. Порядок та правіла заливання рідкої шихти. Плавлення. Полірування. Доводка по складу, по температурі. Розливання металу.

Призначення, конструкції та принцип дії нагрівальних колодязів. Печі для нагрівання зливків, їх загальна характеристика, Регенеративні нагрівальні колодязі. Рекуперативні нагрівальні колодязі з опаленням з центру подини. Рекуперативні нагрівальні колодязі з верхнім опаленням. Пальники та теплоутилізатори нагрівальних колодязів. Конструкція центрального пальника рекуперативного колодязя. Інжекційний пальник рекуперативного колодязя. Рекуператори та регенератори нагрівальних колодязів. Сучасні регенератори. Сучасні пальники нагрівальних колодязів. Завантаження та вивантаження злитків. Заправка та прибирання подини. Поточні та капітальні ремонти. Аварійні ситуації в колодязях. Простой колодязів.

Призначення, конструкції та принцип дії нагрівальних печей камерного типу. Устрій нагрівальних печей камерного типу. Пальники, теплоутилізатори та обслуговування нагрівальних камерних печей. Сучасні пальники в камерних печах. Розташування та типи теплоутилізаторів. Посад та видача металу в камерних печах. Ущільнення робочого простору. Системи регулювання та контролю в камерних печах.

Теплові режими нагрівальних колодязів та їх теплова робота. Типові режими нагрівання металу в нагрівальних колодязях. Нагрівання при постійній потужності. Витримка при постійній температурі печі. Типові температурні та теплові діаграми нагрівання металу в колодязях. Нагрівання металу гарячого посаду.

Теплова робота камерних печей. Режими нагрівання металу. Забезпечення вимог при нагріванні металу в камерних печах. Рециркуляція газів. Імпульсне опалення. Об'ємне спалювання в камерних печах. Заходи з енергозбереження в камерних печах.

Конструкції методичних печей. Печі для безперервного нагрівання плоских, квадратних та круглих заготовок, їх загальна характеристика. Штовхальні методичні нагрівальні печі. Методичні нагрівальні печі з крокуючим подом та крокуючими балками. Устрій подини. Крок подини. Особливості пальників печей з крокуючим подом та крокуючими балками.

Конструкції кільцевих, секційних, роликових та інших нагрівальних печей безперервної дії. Конструкції печей для нагрівання круглої заготовки. Кільцеві печі трубопрокатних і колесопрокатних заводів. завантаження та вивантаження заготівель. Крок руху подини. Устрій стін та зведення кільцевої печі. Устрій прохідних печей: роликової, секційної, конвеєрної та інших печей. Транспортування металу в цих печах.

Тепловий та температурний режими прохідних печей. Температурний і тепловий режими роботи прохідних печей. Зони прохідних печей. Рух металу та газів в печах. Аналіз теплового балансу. Теплові потужності та витрата палива в прохідних печах. Заходи зі зниження витрати палива в прохідних печах.

Індивідуальне завдання (12 годин)

Розрахунок конструкції сталеплавильного агрегату.

Практична робота (16 години)

Складання теплового балансу та визначення техніко-економічних показників нагрівальної печі періодичної дії.

Рекомендована література

1. Metallurgicheskaya teplotekhnika / Кривандин В.А., Неведомская И.Н. Кобахидзе В.В. и др. М. : Metallurgiya, Т. 2, 1986.
2. Егоров А.В. Расчёт мощности и параметров электропечей черной металлургии. М.: Metallurgiya, 1990.
3. Губинский В. И. Metallurgicheskie печи / В. И. Губинский. – Днепропетровск : НМетАУ, 2006. – 84 с.
4. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии: Учебник для ВУЗов. М. : Metallurgiya, 1989, 462 с.
5. Ерёмин А.О. Разработка и применение объёмно-регенеративного способа сжигания топлива в нагревательных печах // Ерёмин А.О., Сибирь А.В., Губинский В.И. / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2008. – № 6. – С.88-91.
6. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : Учебное пособие для вузов. / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 154 с.
7. Metallurgicheskie печи. Теория и расчёты: Учебник в 2-х т. Том 2. / В.И. Губинский и др. - Минск: Беларус. наука, 2007. – 832 с.

2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

«Розрахунок конструкції сталеплавильного агрегату»

2.1 Загальні відомості

У теперішньому часі існує декілька типів сталеплавильних агрегатів: мартенівські печі, двохванні печі, ЛД-конвертери, електродугові печі, вакуумні електричні печі з електродом, що витрачається, плазмові печі та ін. Однак практично вся якісна сталь виготовляється в трьох типах агрегатів: ЛД-конверторі, мартенівській печі або її модифікації й електродуговій печі.

Ванна сталеплавильних печей є самим відповідальним елементом робочого простору та всієї печі. При неправильному виконанні ванни можливий відхід металу в під або робота з високими порогами у завалочних вікнах.

Верхнім вогнетривким шаром кладки ванни є так звана наварка, що виконується із суміші магнезитового порошку меленим шлаком або окалиною. В процесі служби поду наварка піддається дії високих температур, хімічному впливу розплавлених металу та шлаків, ударним впливам з боку шихтових матеріалів, що заливають у піч. В результаті практично після кожної плавки наварка поду має ушкодження, які виправляють шляхом насипання магнезитового порошку на ушкоджені місця.

Таким чином, у процесі роботи під піддається впливам протилежного характеру (зношуванню і відновленню), у результаті яких формується певний профіль ванни. Обстеження працюючих печей показало, що поперечний і поздовжній профіль сталеплавильної ванни печей можуть бути описані формулою гіперболи, а поверхня ванни рівнянням гіперболоїда.

Рівняння поверхні ванни

$$\frac{z^2}{c^2} - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

де x, y, z – значення координат, m ; a, b, c – коефіцієнти, які беруться залежно від кута «скочування» шлаку.

Кут натурального укосу магнезитового порошку становить $\sim 35^\circ$, кут укосів, що заправляють, повинен дорівнювати куту натурального укосу заправних матеріалів або бути більше його на $4-5^\circ$, а кут поперечних укосів становить $15-25^\circ$ (кут «скочування» шлаку). Таким чином, максимальна

величина кута укосу не повинна перевищувати $\sim 40^\circ$, а мінімальна не повинна бути менше 13° .

$$\text{Рівняння поперечного укосу } \frac{z^2}{c^2} - \frac{x^2}{a^2} = 1.$$

$$\text{Рівняння поздовжнього укосу } \frac{z^2}{c^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

При відомому рівнянні поверхні ванни та даній глибині ванни легко знайти її об'єм

$$V_B = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{c} \cdot \left(\frac{h^3}{3 \cdot c} + h^2 \right), \quad (2.1)$$

де h – глибина ванни, м

Приблизно об'єм ванни знаходиться також ь по формулі

$$V_B \approx K_e \cdot B \cdot L \cdot h, \quad (2.2)$$

де $K_e = 0,36 \div 0,39$ – коефіцієнт ємкості ванни;

B, L – ширина та довжина ванни сталеплавильного агрегату, м.

2.2 Приклад виконання індивідуального завдання «Розрахунок конструкції сталеплавильного агрегату»

2.2.1 Завдання

Розрахувати розміри та об'єм сталеплавильної ванни.

2.2.2 Вихідні дані:

- 1) ємність печі по металу $E = 245$ т;
- 2) кут поперечних укосів 21° ;
- 3) маса шлаку у % від маси металу $\%_{\text{шл}} = 12\%$;
- 4) щільність шлаку $\rho_{\text{шл}} = 2500$ кг/м³;
- 5) щільність металу $\rho_{\text{м}} = 7800$ кг/м³.

Вихідні дані для виконання розрахунку беруться з таблиці 2.1 згідно з варіантом студента.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ємність печі по металу, т	210	220	230	225	250	260	270	200	215	210	240	220	230	240	245	260	270

2.2.3 Розрахунок конструкції сталеплавильної ванни

Маса шлаку в печі

$$M_{\text{шл}} = \%_{\text{шл}} \cdot E = 12 \cdot 245 = 29,4 \text{ т.}$$

Об'єм, який займає шлак в печі

$$V_{\text{шл}} = \frac{M_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шл}}} = \frac{294}{2500} = 11,76 \text{ м}^3.$$

Об'єм, який займає метал у печі

$$V_{\text{м}} = \frac{M_{\text{м}}}{\rho_{\text{м}}} = \frac{245}{7800} = 31,41 \text{ м}^3.$$

Об'єм ванни

$$V_{\text{в}} = V_{\text{шл}} + V_{\text{м}} = 11,76 + 31,41 = 43,17 \text{ м}^3.$$

Всі рідкі продукти утримуються ванною, а помилкові пороги, висотою 300 мм служать для утримання киплячого шлаку та його можливого надлишку.

Глибина ванни визначається за формулою (2.1)

$$V_{\text{в}} = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{c} \cdot \left(\frac{h^3}{3 \cdot c} + h^2 \right).$$

Для кута укосу 21° коефіцієнти дорівнюють: $a = 1,2$, $b = 2,7$, $c = 1$.

Після перетворення одержуємо кубічне рівняння:

$$h^3 + 3 \cdot c \cdot h^2 - 3 \cdot V_{\text{в}} \cdot \frac{c^2}{\pi \cdot a \cdot b} = 0.$$

Коефіцієнти канонічного рівняння: $A = 1$; $B = 3 \cdot c = 3$; $C = 0$;

$$D = -3 \cdot V_{\text{в}} \cdot \frac{c^2}{\pi \cdot a \cdot b} = \frac{-3 \cdot 43,17 \cdot 1^2}{\pi \cdot 1,2 \cdot 2,7} = -12,724.$$

Вирішуємо кубічне рівняння в радикалах.

а) вводимо нову змінну $I = h + B/3 \cdot A$

б) знаходимо величини

$$2 \cdot q = \frac{2 \cdot B^3}{27 \cdot A^3} - \frac{B \cdot C}{3 \cdot A^2} + \frac{D}{A} = \frac{2 \cdot 3^3}{27 \cdot 1^3} - \frac{3 \cdot 0}{3 \cdot 1^2} + \frac{(-12,724)}{1} = -10,724,$$

$$q = \frac{-10,724}{2} = -5,362,$$

$$3 \cdot p = \frac{3 \cdot A \cdot C - B^2}{3 \cdot A^2} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 0 - 3^2}{3 \cdot 1^2} = -3,$$

$$p = \frac{-3}{3} = -1.$$

в) знаходимо дискримінант

$$\text{Discr} = q^2 + p^3 = (-5,362)^2 + (-1)^3 = 16,584.$$

Якщо $\text{Discr} > 0$, а $p < 0$, то рішення має один дійсний корінь. Два уявних корені рішення для даного завдання не мають сенсу.

Дійсний корінь $I_1 = -2 \cdot r \cdot \text{ch}\left(\frac{\psi}{3}\right)$, де $\text{ch}(\psi)$ – гіперболічний косинус.

$r = -1$, тому що r збігається зі знаком p , а значення ψ знаходимо з виразу

$$\text{ch}(\psi) = \frac{q}{r^3} = \frac{-5,362}{(-1)^3} = 4,193.$$

За таблицями гіперболічних функцій знаходимо ψ , яке відповідає $\text{ch}(\psi)$.

Таким чином $\psi = 2,112$.

$$\text{Дійсний корінь дорівнює } I_1 = -2 \cdot r \cdot \text{ch}\left(\frac{\psi}{3}\right) = (-2) \cdot (-1) \cdot \text{ch}\left(\frac{2,112}{3}\right) = 2,516.$$

Знаходимо глибину ванни $h = I_1 - B/3 \cdot A = 2,516 - 3/3 \cdot 1 = 1,516$ м.

Ширина печі B визначається з рівняння: $(h + c)^2 / c^2 - (0,5 \cdot B)^2 / a^2 = 1$;

$$B = 5,542 \text{ м.}$$

Довжина печі L визначається з рівняння: $(h + c)^2 / c^2 - (0,5 \cdot L)^2 / b^2 = 1$;

$$L = 12,47 \text{ м.}$$

Відношення довжини до ширини ванни: $L/B = 12,47/5,542 = 2,25$.

Максимально припустима величина цього відношення не повинна перевищувати 3,174.

Площа поду печі

$$F_{\Pi} = L \cdot B = 12,47 \cdot 5,542 = 69,112 \text{ м}^2.$$

Питоме навантаження на під

$$p = E/F_{\Pi} = E/F_{\Pi} = 200/69,112 = 2,894 \text{ т/м}^2.$$

При робочому проектуванні печі дані розміри округляються для досягнення технічної доцільності та точності. Для даного розрахунку:

$$h = 1516 \approx 1520 \text{ мм};$$

$$B = 5542 \approx 5550 \text{ мм};$$

$$L = 12470 \text{ мм}.$$

2.3 Контрольні запитання для захисту індивідуального завдання

Які типи сталеплавильних агрегатів вам відомі?

Яку назву має верхній вогнетривкий шар кладки ванни?

Якою формулою можуть бути описані поперечний і поздовжній профіль сталеплавильної ванни агрегату?

Яка максимальна та мінімальна допустима величина кута укосу?

Запишіть формулу для визначення об'єму ванни.

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

«Складання теплового балансу та визначення техніко-економічних показників
нагрівальної печі періодичної дії»

3.1 Загальні відомості

Тепловий баланс печі періодичної дії виражається рівнянням, що зв'язує прибуток ($Q_{\text{приб}}$) і витрату теплоти ($Q_{\text{вит}}$):

$$Q_{\text{приб}} = Q_{\text{вит}}.$$

Оскільки такі печі характеризуються змінним у часі температурним і тепловим режимом нагрівання металу, то для них тепловий баланс складається за весь процес нагрівання, а статті теплового балансу виражаються у Джоулях за один цикл роботи печі (нагрівання металу).

На рис. 3.1 схематично показано тепловий баланс камери нагрівального колодязя.

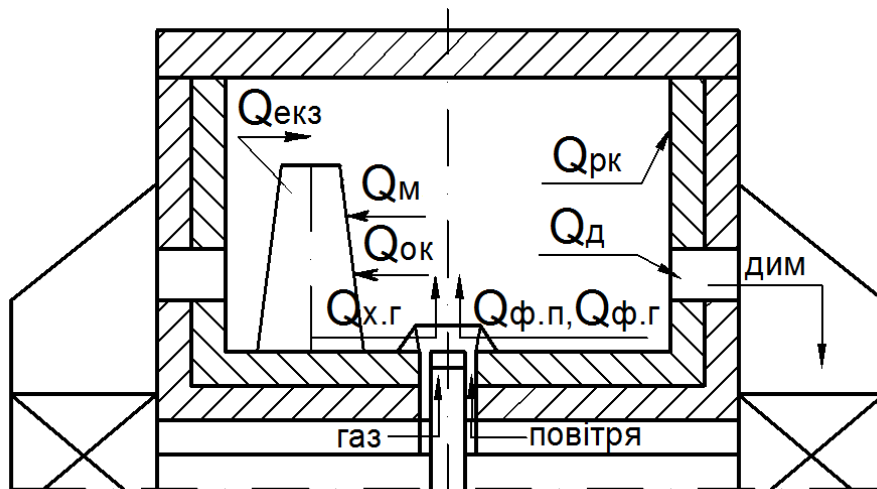


Рис. 3.1 - Тепловий баланс камери рекуперативного нагрівального колодязя з опаленням з центру подини

Прибуткові статті теплового балансу:

– хімічна теплота спалювання палива:

$$Q_{\text{х.г}} = \bar{V}_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \tau_{\Sigma}, \quad (3.1)$$

де $\bar{V}_Г$ – середня витрата палива, $\text{м}^3/\text{год}$; Q_H^p – нижча робоча теплота згоряння палива, $\text{Дж}/\text{м}^3$; τ_Σ – загальний час нагрівання металу в робочій камері печі, год ;

– теплота, що вноситься в піч з підігрітим повітрям, яке подається на спалювання палива:

$$Q_{ф.п} = \bar{V}_п \cdot C_{п}^{t_{п}} \cdot t_{п} \cdot \tau_\Sigma, \quad (3.2)$$

де $\bar{V}_п$ – середня витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_{п}^{t_{п}}$, $t_{п}$ – питома теплоємність та температура підігрітого повітря, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ та $^\circ\text{C}$;

– теплота, що вноситься в піч з підігрітим паливом, яке йде на горіння:

$$Q_{ф.Г} = \bar{V}_Г \cdot C_{Г}^{t_{Г}} \cdot t_{Г} \cdot \tau_\Sigma, \quad (3.3)$$

де $C_{Г}^{t_{Г}}$, $t_{Г}$ – питома теплоємність та температура палива, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ та $^\circ\text{C}$;

– теплота екзотермічних реакцій окислення заліза:

$$Q_{екз} = q_{ок} \cdot P \cdot \delta \cdot \tau_\Sigma, \quad (3.4)$$

де $q_{ок}$ – питома теплота, яка виділяється під час окислення заліза, $\text{Дж}/\text{кг}$; P – продуктивність печі, $\text{кг}/\text{год}$; δ – втрати металу в окалину (маса окалини, яка утворюється при окисленні 1 кг сталі).

Витратні статті теплового балансу:

– теплота, яка засвоюється металом під час нагрівання

$$Q_m = E \cdot \Delta i_{заг}, \quad (3.5)$$

де E – ємність робочої камери печі, кг ; $\Delta i_{заг}$ – прирощення питомої ентальпії металу за весь процес нагрівання, $\text{Дж}/\text{кг}$;

– втрати теплоти з окалиною:

$$Q_{ок} = \delta \cdot m \cdot P \cdot C_{ок}^{\bar{t}_{ок}} \cdot \bar{t}_{ок} \cdot \tau_\Sigma, \quad (3.6)$$

де $C_{ок}^{\bar{t}_{ок}}$, $\bar{t}_{ок}$ – питома теплоємність та середньомасова температура окалини на виході з печі, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ та $^\circ\text{C}$; m – кількість окислів, що утворюються під час окислення 1 кг сталі;

– втрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі:

$$Q_d = \bar{V}_d \cdot C_d^{t_d} \cdot t_d \cdot \tau_\Sigma, \quad (3.7)$$

де \bar{V}_d – середня витрата димових газів, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_d^{t_d}$, t_d – питома теплоємність та температура димових газів на виході з печі, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ та $^{\circ}\text{C}$;

– втрати теплоти робочої камери:

$$Q_{\text{рк}} = \sum Q_{\text{втр}} \cdot \tau_{\Sigma} , \quad (3.8)$$

де $\sum Q_{\text{втр}}$ – теплові втрати робочої камери печі, $\text{Дж}/\text{год}$.

Теплові баланси призначені для визначення основних техніко-економічних показників роботи печей, таких як: продуктивність печі, загальна теплова потужність, коефіцієнт використання теплоти палива, коефіцієнт корисної дії печі, питома витрата палива.

3.2 Завдання

У завданні необхідно скласти тепловий баланс та визначити техніко-економічні показники рекуперативного нагрівного колодязя.

3.2.1 Вихідні дані для розрахунку

При виконанні проектних розрахунків нагрівальних печей, складанню теплового балансу передують:

- 1) розрахунок спалювання палива;
- 2) визначення розмірів робочої камери печі;
- 3) визначення параметрів зовнішнього теплообміну в робочій камері печі;
- 4) розрахунок нагрівання металу;
- 5) визначення теплових втрат робочою камерою печі.

При проектуванні нагрівального колодязя з опаленням з центру подини згадані вище розрахунки виконуються за методикою, наведеною в роботі [7], а їх результати використовуються як вихідні данні для складання теплового балансу та визначення техніко-економічних показників печі.

Вихідні дані:

- $Q_H^p = 9000 \text{ Дж}/\text{м}^3$ – нижча теплота спалювання природно-доменної суміші;

- $L_n = 2,368 \text{ м}^3_{\text{пов}}/\text{м}^3_{\text{пал}}$ – дійсна необхідна кількість повітря;

- $\vartheta_d = 3,246 \text{ м}^3/\text{м}^3_{\text{пал}}$ – питомий об’єм продуктів горіння;
- $t_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура палива;
- кладка футерівки печі – двошарова;
- внутрішній шар футерівки товщиною $S_1 = 600 \text{ мм}$ виконано із шамоту;
- зовнішній, теплоізоляційний шар футерівки товщиною $S_2 = 115 \text{ мм}$ – з пористого легковагового шамоту;
- кришка колодязя одношарова, товщиною $S_{\text{кр}} = 360 \text{ мм}$ – із шамоту;
- $F_{\text{кл}} = 121,81 \text{ м}^2$ – площа внутрішньої поверхні кладки стін та поду печі;
- $F_{\text{кр}} = 29,921 \text{ м}^2$ – площа поверхні кришки колодязя;
- $F_{\text{в}} = 5,07 \text{ м}^2$ – площа двох димових вікон, через які димові гази покидають робочій простір печі;
- режим нагрівання металу – комбінований, що складається з двох періодів нагрівання: перший період нагрівання здійснюється при постійній загальній тепловій потужності печі; другий період – при постійній температурі печі;
- матеріал злитків Ст. 3;
- $V_{\text{м}} = 13,872 \text{ м}^3$ – об’єм металу;
- $\rho_{\text{м}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ – щільність металу;
- $F_{\text{м}} = 78,437 \text{ м}^2$ – загальна поверхня нагріву злитків.
- $m_0 = 130142 \text{ Вт/м}^2$ – питома теплова потужність у першому періоді нагрівання металу;
- $t_{\text{кл.к1}} = 1198 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура кладки печі наприкінці першого періоду нагрівання;
- $q_{\text{к}} = 6691 \text{ Вт/м}^2$ – питома густина потоку наприкінці нагрівання;
- $\eta_{\text{к1}} = 0,519$ – коефіцієнт використання теплоти палива наприкінці першого періоду нагрівання;
- $\eta_{\text{к}} = 0,546$ – коефіцієнт використання теплоти палива наприкінці нагрівання;

- $\bar{\eta} = 0,559$ – середній коефіцієнт використання теплоти палива у першому періоді нагрівання;
- $t_{\text{печ.к}} = 1267 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура робочої камери печі наприкінці нагрівання;
- $t_{\text{ср.мк}} = 1223 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та $t_{\text{ср.мпоч}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – середньомасова температура злитків при їх посаді в піч та наприкінці нагрівання ($i_{\text{к}}^{t_{\text{ср.мк}}} = 860,876$ та $i_{\text{поч}}^{t_{\text{ср.мпоч}}} = 0 \text{ Дж/кг}$ – питома ентальпія матеріалу злитка при посаді в печі та наприкінці нагрівання);
- $\bar{t}_{\text{д}} = 1240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та $i_{\text{д}}^{\bar{t}_{\text{д}}} = 2045,39 \text{ кДж/м}^3$ – середня температура продуктів спалювання палива та їхня ентальпія;
- $\tau_{\Sigma} = 8,695 \text{ год}$ – загальний час нагрівання металу;
- $t_{\text{нс}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура навколишнього середовища;
- $r_{\text{ф}} = 0,4$ – ступінь рекуперації теплоти.
-

Вихідні дані вводяться відповідно до варіанту студента з таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

№	$t_{\text{кл.к1}}$	$F_{\text{кл}}$	m_0	τ_{Σ}	$V_{\text{м}}$
1	1175	130	130000	7	14
2	1205	115	126500	6,5	13,5
3	1150	100	128500	8	12,5
4	1160	105	128000	8,5	13
5	1170	110	127500	7,5	13,5
6	1180	115	127000	7	13,9
7	1190	120	126500	7,4	12
8	1200	130	129000	6,5	14
9	1210	135	129500	6	14,5
10	1220	125	127500	8	15

3.2.2 Розрахункова частина. Складання теплового балансу робочої камери нагрівального колодязя та розрахунок теплових потужностей

Розрахунок втрат теплоти теплопровідністю крізь кладку

Теплові втрати через футерівку печі визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{кл}} = q_{\text{кл}} \cdot F_{\text{кл}} = K \cdot (t_{\text{кл.кл}} - t_{\text{нс}}) \cdot F_{\text{кл}}, \quad (3.9)$$

де $q_{\text{кл}}$ – питомий тепловий потік через кладку стін робочої камери печі, Вт/м²;

$$K = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3}} - \text{коефіцієнт теплопередачі із робочого простору в}$$

навколишнє середовище, Вт/(м² К);

λ_1, λ_2 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу кладки, при середній температурі шару, Вт/(м К);

$\alpha_3 = 28,5$ Вт/(м² К) – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кладки в навколишнє середовище.

Температура на стику шарів кладки:

$$\bar{t}_{\text{кл}} = 0,5 \cdot (t_{\text{кл.кл}} + t_{\text{нс}}) = 0,5 \cdot (1198 + 0) = 599 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Орієнтовна середня температура першого шамотного шару кладки:

$$\bar{t}_1 = 0,5 \cdot (t_{\text{кл.кл}} + \bar{t}_{\text{кл}}) = 0,5 \cdot (1198 + 599) = 899 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Орієнтовна середня температура другого теплоізоляційного шару:

$$\bar{t}_2 = 0,5 \cdot (\bar{t}_{\text{кл}} + t_{\text{нс}}) = 0,5 \cdot (599 + 0) = 300 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнти теплопровідності:

а) шамоту

$$\lambda_1 = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_1 = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 899 = 1,273 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

б) пористого легковагового шамоту

$$\lambda_2 = 0,2326 + 0,2326 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_2 = 0,2326 + 0,2326 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 0,302 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Коефіцієнт теплопередачі через кладку печі:

$$K = \frac{1}{\frac{0,6}{1,273} + \frac{0,115}{0,302} + 0,035} = 1,128 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Густина теплового потоку:

$$q_{\text{кл}} = 1,128 \cdot (1198 - 0) = 1351 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Втрати тепла через кладку стін та подину колодязю:

$$Q_{\text{кл}} = q_{\text{кл}} \cdot F_{\text{кл}} = 1351 \cdot 121,81 = 164565 \text{ Вт}.$$

Втрати тепла теплопровідністю через кришку колодязя визначаються аналогічно:

$$Q_{\text{кр}} = q_{\text{кр}} \cdot F_{\text{кр}} = K_{\text{кр}} \cdot (t_{\text{кл.кл}} - t_{\text{нс}}) \cdot F_{\text{кр}}, \quad (3.10)$$

де $q_{\text{кр}}$ – питомий тепловий потік через кришку камери, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$$K_{\text{кр}} = \frac{1}{\frac{S_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} + \frac{1}{\alpha_3}} - \text{коефіцієнт теплопередачі через кришку в навколишнє}$$

середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$;

$\lambda_{\text{кр}} = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_{\text{кр}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу кришки, при середній температурі кришки, $\text{Вт}/(\text{м К})$;

$\bar{t}_{\text{кр}} = 0,5 \cdot (t_{\text{кл.кл}} - t_{\text{нс}}) = 0,5 \cdot (1198 + 0) = 599^\circ\text{С}$ – середня температура по товщині кришки.

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу кришки:

$$\lambda_{\text{кр}} = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t}_{\text{кр}} = 0,698 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 599 = 1,081 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Коефіцієнт теплопередачі та теплові втрати через кришку робочої камери:

$$K_{\text{кр}} = \frac{1}{\frac{0,36}{1,081} + 0,035} = 2,718 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$Q_{\text{кр}} = 2,718 \cdot (1198 - 0) \cdot 29,921 = 97428 \text{ Вт}.$$

Теплові втрати теплопровідністю через кладку печі:

$$Q_{\text{кам}} = Q_{\text{кл}} + Q_{\text{кр}} = 164561 + 97428 = 261993 \text{ Вт.}$$

Розрахунок теплових втрат випромінюванням через димове вікно

Втрати тепла випромінюванням:

$$\begin{aligned} Q_{\text{випр}} &= 5,67 \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{печ.к}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{кам}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{в}} = \\ &= 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1267 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1167 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 5,07 = 380801 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

де $t_{\text{кам}} = t_{\text{печ.к}} - 100$ – температура у наднасадочному просторі, °С.

Невраховані теплові втрати

Приймаємо невраховані втрати теплоти робочою камерою нагрівального колодязя 10 % від суми втрат теплоти через кладку печі та випромінюванням в наднасадочний простір.

$$Q_{\text{нв}} = 0,1 \cdot (Q_{\text{кам}} + Q_{\text{випр}}) = 0,1 \cdot (261993 + 380801) = 64279 \text{ Вт.}$$

Втрати теплоти теплопровідністю через кладку печі

$$\Sigma Q_{\text{втр}} = Q_{\text{кам}} + Q_{\text{випр}} + Q_{\text{нр}} = 261993 + 380801 + 64297 = 707073 \text{ Вт}$$

$$\text{або } \frac{707073 \cdot 3600}{10^3} = 2,545 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Розрахунок потужності холостого ходу колодязя

Потужність холостого ходу колодязю приймається рівною потужності холостого ходу наприкінці першого періоду нагрівання:

$$M_{\text{хх.к}} = \frac{\Sigma Q_{\text{втр}}}{\eta_{\text{кл}}} = \frac{707073}{0,519} = 1362366 \text{ Вт} \quad \text{або} \quad \frac{1362369 \cdot 3600}{10^3} = 4,905 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Розрахунок максимальної потужності колодязя

Максимальна теплова потужність колодязю:

$$M_{p.\max} = m_0 \cdot F_M = 130142 \cdot 78,437 = 10,21 \cdot 10^6 \text{ Вт або } 36,749 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Максимальна загальна теплова потужність колодязю:

$$M_{0.\max} = M_{p.\max} + M_{\text{хх.к}} = (36,749 + 4,905) \cdot 10^6 = 41,654 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Максимальна витрата газу на опалення колодязю:

$$V_{г.\max} = \frac{M_{0.\max}}{Q_H^p} = \frac{41,654 \cdot 10^6}{9000} = 4628 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Максимальна витрата повітря для горіння газу:

$$V_{п.\max} = L_n \cdot V_{г.\max} = 2,368 \cdot 4628 = 10959 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Максимальна витрата диму із колодязю:

$$V_{д.\max} = \vartheta_d \cdot V_{г.\max} = 3,246 \cdot 4628 = 15023 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Розрахунок мінімальної теплової потужності колодязя

Мінімальна загальна теплова потужність.

$$M_{p.\min} = \frac{q_k \cdot F_M}{\eta_k} = \frac{6691 \cdot 78,437}{0,546} = 961212 \text{ Вт або } 3,46 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Мінімальна загальна теплова потужність:

$$M_{0.\min} = M_{p.\min} + M_{\text{хх.к}} = 3,46 \cdot 10^6 + 4,905 \cdot 10^6 = 8,365 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Мінімальні витрати газу, повітря та палива:

$$V_{г.\min} = \frac{M_{0.\min}}{Q_H^p} = \frac{8,365 \cdot 10^6}{9000} = 929 \frac{\text{м}^3}{\text{год}};$$

$$V_{п.\min} = L_n \cdot V_{г.\min} = 2,368 \cdot 929 = 2200 \frac{\text{м}^3}{\text{год}};$$

$$V_{д. \min} = \vartheta_{д} \cdot V_{г. \min} = 3,246 \cdot 929 = 3016 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Розрахунок середніх теплових потужностей печі

Ємність робочої камери:

$$E = V_{м} \cdot \rho_{м} = 13,872 \cdot 7800 = 108201,6 \text{ кг}.$$

Продуктивність колодязю:

$$P = \frac{E}{\tau_{\Sigma}} = \frac{108201,6}{8,695} = 12444 \text{ кг/год} \quad \text{або} \quad 12,444 \text{ т/год}.$$

Середня засвоєна металом потужність:

$$\overline{M}_{зас} = P \cdot \Delta i_{заг} = 12444 \cdot 860,876 = 10712741 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

де $\Delta i_{заг} = i_{к}^{t_{ср.мк}} - i_{поч}^{t_{ср.мпоч}} = 860,876 - 0 = 860,876$ – зміна питомої ентальпії металу, Дж/кг.

Середня робоча потужність:

$$\overline{M}_p = \frac{\overline{M}_{зас}}{\eta} = \frac{10712741}{0,559} = 19164116 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Середня загальна теплова потужність:

$$\overline{M}_o = \overline{M}_p + \overline{M}_{хх} = 19,164 \cdot 10^6 + 4,905 \cdot 10^6 = 24,069 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Середні витрати газу, повітря та палива:

$$\overline{V}_г = \frac{\overline{M}_o}{Q_{н}^p} = \frac{24,069 \cdot 10^6}{9000} = 2674 \frac{\text{м}^3}{\text{год}};$$

$$\overline{V}_{п} = L_{н} \cdot \overline{V}_г = 2,368 \cdot 2674 = 6333 \frac{\text{м}^3}{\text{год}};$$

$$\overline{V}_{д} = \vartheta_{д} \cdot \overline{V}_г = 3,246 \cdot 2674 = 8680 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Визначення техніко-економічних показників печі

Коефіцієнт корисної дії печі:

$$\text{КПД} = \frac{\overline{M}_{\text{зас}}}{\overline{M}_o} \cdot 100 = \frac{10,713}{24,069} \cdot 100 = 44,5 \, \%$$

Питома витрата тепла на нагрівання металу:

$$b = \frac{\overline{M}_o}{P} = \frac{24,069 \cdot 10^6}{12,444} = 1,934 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{т}}.$$

Питома витрата умовного палива на нагрівання металу:

$$b' = \frac{b}{29300} = \frac{1,934 \cdot 10^6}{29300} = 66,01 \frac{\text{кг у.п.}}{\text{т}},$$

де 29300 кДж/кг у.п. – теплота згорання умовного палива.

Складання теплового балансу печі

Статті прибутку теплоти:

– хімічна теплота спалювання палива:

$$Q_{\text{х.г}} = \overline{V}_\Gamma \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot \tau_\Sigma = 2674 \cdot 9000 \cdot 8,695 = 209,254 \cdot 10^6 \text{ кДж};$$

– теплота, що вноситься в піч з підігрітим повітрям:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ф.п}} &= \frac{\overline{V}_\Pi \cdot r_{\text{ф}} \cdot \vartheta_{\text{д}} \cdot \bar{i}_{\text{д}}^{\text{т}} \cdot \tau_\Sigma}{L_{\text{н}}} = \frac{6333 \cdot 0,4 \cdot 3,246 \cdot 2045,39 \cdot 8,695}{2,368} = \\ &= 61,756 \cdot 10^6 \text{ кДж}; \end{aligned}$$

Витратні статті теплового балансу:

– теплота засвоєна металом:

$$Q_{\text{м}} = E \cdot \Delta i_{\text{заг}} = 108201,6 \cdot 860,876 = 93,148 \cdot 10^6 \text{ кДж};$$

– втрати теплоти робочою камерою печі:

$$Q_{\text{рк}} = \Sigma Q_{\text{втр}} \cdot \tau_\Sigma = 2,545 \cdot 10^6 \cdot 8,695 = 22,129 \cdot 10^6 \text{ кДж};$$

– теплота, що відходить з печі з димовими газами:

$$Q_{\text{д}} = \overline{V}_{\text{д}} \cdot \bar{i}_{\text{д}}^{\text{т}} \cdot \tau_\Sigma = 8680 \cdot 2045,39 \cdot 8,695 = 154,371 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП.	3
1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ»	4
2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ «Розрахунок конструкції сталеплавильного агрегату»	10
2.1 Загальні відомості.	10
2.2 Приклад виконання індивідуального завдання «Розрахунок конструкції сталеплавильного агрегату».	11
2.3 Контрольні запитання до індивідуального завдання.	14
3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ «Складання теплового балансу та визначення техніко- економічних показників нагрівальної печі періодичної дії.	15
3.1 Загальні відомості.	15
3.2 Завдання.	17
3.3 Контрольні запитання до практичної роботи.	26